

Programme de recherche
chaleur ambiante et rejets thermiques;
installations chaleur-force

Chauffage et climatisation à l'aide de l'air de l'alluvion ancienne dénoyée

Préparé par
Christophe Dériaz
Géotechnique appliquée Dériaz SA
9, chemin des Vignes, CH-1213 Petit-Lancy
gadz@gkb.com

Sur mandat de
l'Office fédéral de l'énergie

Août 2001 Rapport final

Résumé :

L'Air circulant dans les dépôts fluvio-glaciaires ou morainiques graveleux très perméables et dénoyés (à Genève « alluvion ancienne ») a une température d'environ 10° et est disponible toute l'année soit pour le chauffage soit pour la climatisation.

L'objectif de la présente étude préliminaire était de déterminer la puissance de ventilation et le coût spécifique liés à l'exploitation de cet air et d'estimer le potentiel en Suisse pour cette source de froid et de chaud.

L'étude analyse différentes formules qui permettent une estimation rapide de la rentabilité d'une installation d'extraction d'air.

Le potentiel suisse est estimé à un maximum 0.5 % de la population. Il est limité, le système n'étant applicable que pour des villas situées dans des zones géologiquement très favorables. Dans ce cas, la puissance spécifique de ventilation est de 10 % de la chaleur conduite à l'évaporateur de la pompe à chaleur.

Les coûts d'investissement pour une villa (hors PAC) sont estimés à 72'000 frs.
Une installation d'essai, qui permettrait une vérification in situ est proposée.

Abstract :

The air flowing trough unsaturated natural gravel has around the year a temperature above 10° C. It could be used for heating and air conditioning.

The aim of the study is to determine the ventilator energy necessary to extract the air and for which part of the Swiss population such an extraction could be possible.

In order to design an extraction installation, different simple approaches are proposed. They demonstrate that it may only be applied in very favorable places and only for villas. Such conditions will be present for about 0.5% of de Swiss population. In that case the ventilator energy will amounts to 10% of the energy brought to the evaporator.

The investment for extracting the air reaches about 72'000 frs. A test program is also proposed.

Zusammenfassung :

Im Raume Genf existieren die sogenannten "alluvions anciennes". Dies sind natürliche ungesättigte Schotterschichten mit Mächtigkeiten von bis zu deutlich mehr als 10 m. In diesen Schotterschichten findet eine natürliche Luftzirkulation statt. Diese Luftströmungen weisen übers Jahr eine nahezu konstante Temperatur von ca. 10°C auf - eine ideale Wärme- bzw. Kältequelle für
eine Wärmepumpe zur Heizung und Klimatisierung von Gebäuden.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Ventilatorleistung sowie die Investitions- und Betriebskosten zur Nutzung dieser Schotterluft zu bestimmen. Gleichzeitig wird das Potential dieser Schotterschichten für die gesamte Schweiz abgeschätzt.

Mit Hilfe von einfachen Formeln werden Beispiel-Anlagen dimensioniert. Dabei zeigt sich, dass nur Einfamilienhäuser - sofern an einem optimalen Standort gelegen - in Frage kommen. In diesem Fall beträgt die Ventilatorleistung ca. 10% der Verdampferleistung der Wärmepumpe. Obige Einschränkung führt zu einem Potential von ca. 0.5% bezogen auf die Schweizer Bevölkerung.

Die notwendigen Investitionskosten für ein EFH werden auf ca. CHF 72'000 geschätzt. Der Bau einer entsprechende Pilotanlage wird vorgeschlagen.

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. L'auteur est seul responsable du contenu et des conclusions.

Table des matières.

1 Situation initiale. 3
2 Objectif du travail. 4
3 Démarche adoptée. 4
4 Principaux résultats. 5
4.1 Paramètres physiques de l'alluvion ancienne. 5
4.2 Calculs préliminaires d'extraction d'air au puits de Vessy. 6
4.2.1 Géométrie et observations. 6
4.2.2 Equations simples. 7
4.2.3 Calcul avec le logiciel MODAIR V1.0. 8
4.2.4 Enseignements des calculs sur le puits de Vessy. 10
4.3 Simulation d'un projet type « petits immeubles ». 10
4.3.1 Données thermiques. 10
4.3.2 Stratigraphie et propriété du terrain. 10
4.3.3 Prédimensionnement de l'installation d'extraction. 11
4.4 Simulation d'un projet type « villa ». 11
4.4.1 Données thermiques. 11
4.4.2 Stratigraphie et propriété du terrain. 11
4.4.3 Prédimensionnement de l'installation d'extraction. 12
4.5 Précision des calculs. 13
4.6 Coûts. 14
4.7 Potentiel suisse. 14
4.8 Programme d'essai in situ. 15

1 Situation initiale.

De puissantes formations graveleuses, désignées par le terme de cailloutis morainiques profonds ou "alluvion ancienne", existent à Genève. Elles ont été déposées lors de la glaciation du würm. Elles reposent soit sur le substratum rocheux de la molasse chattienne, soit sur la moraine rissienne. Elles sont protégées en surface par un placage de moraine würmienne très peu perméable. Elles abritent les nappes "profondes“ souvent exploitées pour l'alimentation en eau potable.

La présence, dans les zones dénoyées de ces formations, de courants d'air dépendant des variations de pression atmosphérique est bien connue. Ainsi, Alphonse Favre cite déjà ces courants dans ses ouvrages [1]. Un puits soufflant (ou aspirant en fonction de la météo) peut également être observé à Meyrin (GE) au chemin du Grand Puits. Ce phénomène s'observe également dans différents piézomètres, par exemple au stade de St. Genis, en France à proximité du Lion.

L'alluvion ancienne est affleurante à Genève dans les falaises bordant le Rhône et l'Arve, et d'une manière générale dans les dépressions créées par les cours d'eau.

C'est par ces affleurements que l'aspiration ou le refoulement de l'air se produit.

A la fin des années 70, une étude préliminaire effectuée à Genève par le groupe d'étude pompage d'air en collaboration avec le Service Cantonal de Géologie [2] et l'Institut d'Hygiène [3] s'intéressait à la faisabilité et à l'intérêt potentiel d'utiliser les masses d'air circulant au sein des zones dénoyées des puissantes formations graveleuses des cailloutis morainiques profonds, pour le chauffage ou la climatisation.

Début 1997 un groupe s'est à nouveau préoccupé de l'exploitation de l'air de ces graviers. Ce groupe s'est réuni 4 fois en 1997, ainsi que partiellement en 1998 pour la mise au point d'un document de synthèse [4].

Les principales conclusions préliminaires se dégageant de ces études étaient :

1. La température de l'air dans ces formations est proche de 11° toute l'année,
2. 13 % de la population genevoise au maximum pourrait bénéficier de cette source pour le chauffage ou la climatisation,
3. Un premier essai de pompage d'air procure des bases intéressantes pour caler un modèle de calcul,
4. Le dimensionnement d'une installation pilote doit être étudié pour apprécier le potentiel effectif de l'air de ces formations,
5. Le potentiel doit être estimé pour toute la Suisse.

2 Objectif du travail.

La présente étude préliminaire permet de dimensionner par un modèle théorique et sur la base de réflexion économique, un ouvrage de captage de l'air de l'alluvion ancienne. Une estimation du potentiel de cette source d'énergie pour l'ensemble de la Suisse est également réalisée.

Les principaux résultats sont :

- Estimation du potentiel pour l'ensemble de la Suisse.
- Dimension de l'ouvrage de captage et type de crépine.
- Puissance de pompage nécessaire et puissance spécifique de ventilation ($kW_{Ventilation}/kW_{Chaleur\ utile\ à\ l'évaporateur}$).
- Résultats théoriques de la répartition des pressions et débits dans la couche de gravier.
- Estimation du coût spécifique en $Fr/kWh_{Chaleur\ utile}$

Ces résultats permettent, dans une étape ultérieure, la construction d'une installation pilote qui pourra valider les résultats théoriques (non prévue dans le présent projet).

3 Démarche adoptée.

Le présent projet d'étude s'articule de la façon suivante :

- Sur la base de documents existants, détermination des paramètres physiques de l'alluvion ancienne.
- Identification par simulation des paramètres essentiels.
- Modélisation et calcul de la relation débit – perte de charge pour le puits d'essai de Vessy.
- Etudes de cas et tentative d'optimisation économico-énergétique.
- Estimation des coûts spécifiques.
- Estimation du potentiel en Suisse.
- Mise au point d'un programme d'essai in situ.
- Demande d'offre et chiffrage du programme d'essai.

4 Principaux résultats.

4.1 Paramètres physiques de l'alluvion ancienne.

Les paramètres de l'alluvion ancienne hors nappe sont tirés de [2] et [5].

Teneur en eau w	6.6 %
Masse volumique apparente ρ	2.37 t/m^3
Indice de vide e0	0.182
Porosité n	15.4 %
Coefficient d'emmagasinement S (eau)	3 à 8 %
Coefficient de perméabilité (Darcy) k (eau)	1.10^{-5} à 7.10^{-3} m/s
Coefficient de perméabilité intrinsèque K	1.10^{-12} à 7.10^{-10} m^2
Conductivité thermique k (selon Kersten)	3.3 W/m/K
Capacité volumique C	2400 KJ/m^3/K
Température moyenne	**9 à 15 °C**

Le coefficient de perméabilité intrinsèque K est estimé à partir de la perméabilité à l'eau k_{eau} par la relation suivante :

$K=(k_{eau} \bullet \mu_{cinématique_eau})/g \cong 1.10^{-7} \bullet k_{eau}$ (1)
(N.B. : $\mu_{cinématique_eau} = \mu_{dynamique_eau} / \rho$; $\mu_{dynamique}$ ou μ est aussi noté η [kg/m/s ou Pa.s])

Avec k en m/s et K en m^2 (attention le facteur 1.10^{-7} est dépendant des unités).

Cette relation découle de [6] page 141 équations (20) et (21), et est confirmée par la pratique [7].

Pour le calage des modèles de calcul utilisés plus loin, les mesures faites dans le puits de Vessy [2] ont été utilisées. Dans ce cas particulier, les paramètres de calcul sont les suivants :

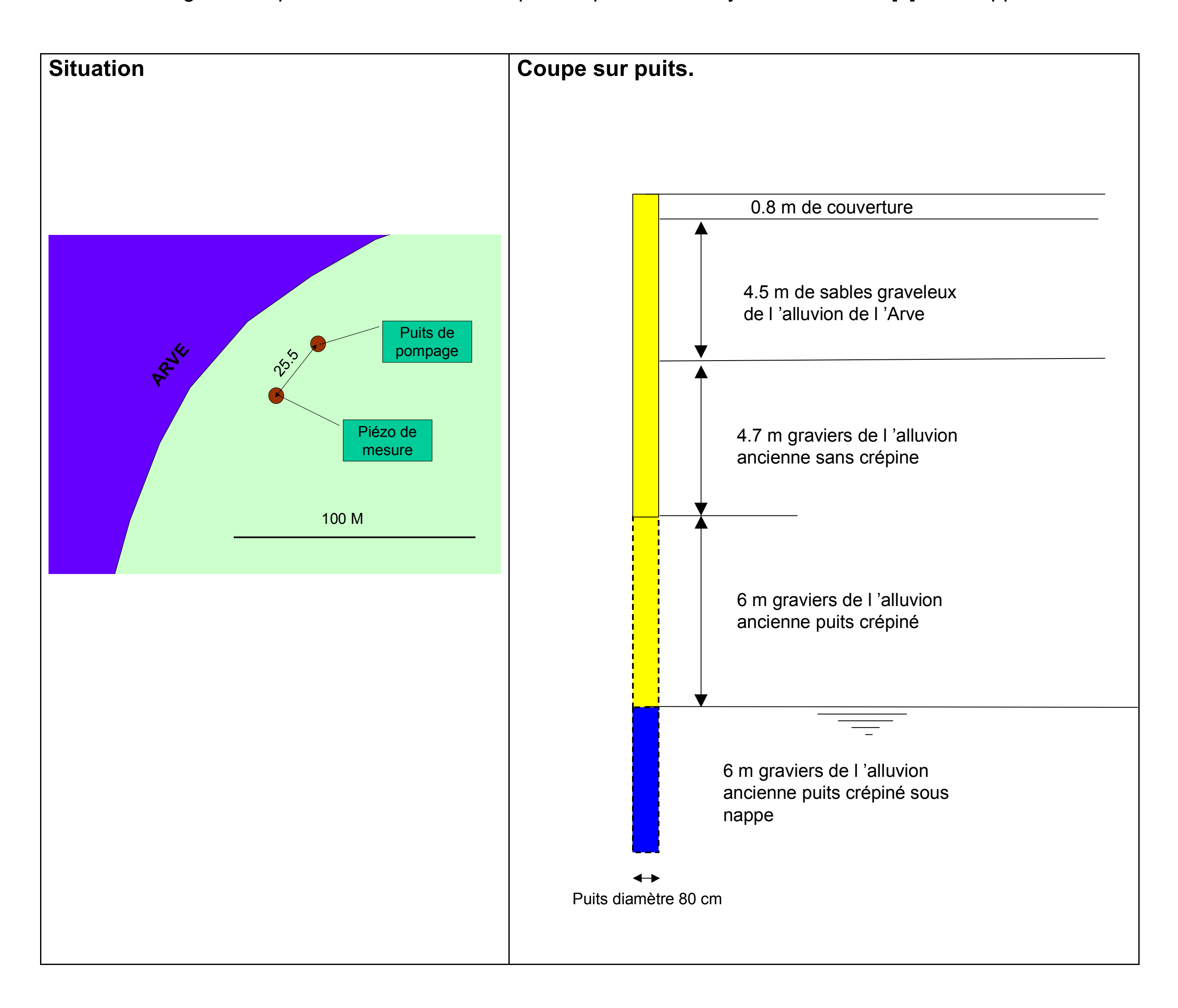
Porosité n	15 %
Coefficient de perméabilité intrinsèque K	7.10^{-10} m^2 ou 700 darcy*

* 1 darcy = 1.10^{-12} m^2

4.2 Calculs préliminaires d’extraction d’air au puits de Vessy.

4.2.1 Géométrie et observations.

Les données géométriques et les observations pour le puits de Vessy données dans [2] sont rappelées ici :



Un essai de pompage d’air a été réalisé le 17.9.1979 avec un ventilateur d’aspiration permettant un débit de 450 m^3/heure. Les dépressions dans le puits de pompage et le piézomètre de mesure ont été mesurées. Après 14 jours de pompage, les dépressions étaient de 180 Pa dans le puits et de 35 Pa dans le piézomètre.

Les mesures effectuées à Vessy en 1979 sont rappelées ci-dessous :

Temps		Dépression Pa	
heure	minute	Dans le puits de pompage	Dans le piézomètre de mesure
	1	140	0
	2	145	
	3	145	
	5	145	0
	10	150	
	15	150	5
	20	150	
	30	150	5
	45	150	
	60	165	10
22	30	165	20
23	30	170	20
25	0	190	20
95	0	190	20
168	0	190	20
192	0	190	20
216	0	180	20
240	0	180	25
264	0	180	25
336	0	180	35

4.2.2 Equations simples.

Différents travaux, notamment [8], montrent que pour le pompage d'air dans le sol, un écoulement laminaire peut généralement être admis. Dans ce cas, on peut utiliser les formules de pompage pour l'eau en introduisant les équivalences données au tableau 1. Ces hypothèses s'appliquent à nos calculs. Elles introduisent toutefois une légère distorsion à proximité immédiate des puits de pompage, si ces derniers ont un diamètre inférieur à 1m.

Tableau 1 : équivalence eau-air

Eau	**Air**	
Niveaux d'eau : h [m]	Pression^2 : P^2 [Pa^2]	(2)
Coefficient d'emmagasinement : S [%]	$\frac{\varepsilon \cdot \mu \cdot \Delta z}{P_0}$ [m•s]	(3)
Transmissivité : T [m^2/s] =k_{eau}• épaisseur nappe	K•Δz [m^3]	(4)
Débit d'eau : Q [m^3/s]	2•μ•P_{puits}•Q_{air} [$m.kg^2/s^4$]	(5)

En introduisant ces relations dans l'équation d'un puits dans une nappe en charge ([6] pages 164-165, équation 13) soit :

$$Q_{eau}=\frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot (h_0 - h_p)}{\ln(R_a / R_p)} \quad (7)$$

On obtient pour l'air la relation :

$$Q_{air} = H \cdot \frac{\pi \cdot K}{\mu} \cdot P_p \cdot \frac{\left[1-(P_{atm}/P_p)^2\right]}{\ln(R_p/R_{atm})} \qquad (8)$$

H : hauteur perméable du puits.

R_p : rayon du puits ou rayon incluant un groupe de puits.

Le rayon d'action du puits R_{atm} peut être estimé à l'aide de la formule de Sichard pour l'eau :
R= $3000 \cdot (H - h_0) \cdot \sqrt{k}$ qui devient pour l'air :

$$R_{atm} = 3000 \cdot \frac{(P_{atm}^2 - P_p^2)}{P_p} \cdot \sqrt{K \cdot H} \qquad \text{K en m}^2 \qquad (9)$$

H : hauteur de la tranche perméable.

Rappelons qu'une erreur sur le rayon d'action n'entraîne qu'une faible modification du débit dans la formule (8). Dans MODAIR présenté plus loin, les limites du modèle numérique (donc le rayon d'action) n'ont pratiquement pas d'influence sur le débit.

Le rayon d'action du puits, de même que la perméabilité, peut également être estimé sur la base du régime permanent selon l'approche développée en page 127 [6] et les équivalences du tableau 1. Cette démarche donne pour les observations données au chapitre 4.2.1 un rayon d'action d'environ 55 m et une perméabilité de $5 \cdot 10^{-10}$ m^2, alors que la formule (9) donne un rayon d'action de 115 m.

L'équation simple de Darcy pour l'eau Q_{eau} =B•T•i devient pour l'air :

$$Q_{air} = \frac{1}{2} \cdot H \cdot B \cdot \left(\frac{K}{\mu}\right) \cdot \frac{\left[P_{atm}^2 - P_p^2\right]}{L \cdot P_p} \qquad (10)$$

H : hauteur de la tranche perméable, B : largeur de la tranche perméable.

Ces équations sont également démontrées dans [9] pages 3.30 à 3.35.

On constate que les valeurs obtenues par les différentes méthodes de calcul sont cohérentes avec les observations données au chapitre 4.1.

4.2.3 Calcul avec le logiciel MODAIR V1.0.

Le logiciel MODAIR est un code par éléments finis, basé sur le logiciel MODFLOW et les relations d'équivalence données dans le tableau 1 du chapitre 3.2.2 [8].

Le maillage est défini sur la base des calculs du chapitre précédent et de la situation et coupe données au chapitre 4.2.1.

Vu en plan, le maillage est constitué de 81 x 81 éléments carrés. A part la ligne et la colonne comprenant le puits d'une largeur de 80 cm, tous les éléments ont un côté de 130 cm.

Le puits de 450 m^3/h de débit se situe sur la 21ème colonne et la 41ème ligne.

Les couches suivantes ont été introduites :

Couche	Epaisseur admise [m]	Perméabilité intrinsèque [darcy]	Porosité à l'air [-]
Couverture	1	Imperméable	-
Graviers non saturés zone non crépinée	4	700	0.15
Graviers non saturés zone non crépinée	2.5	700	0.15
Graviers non saturés zone non crépinée	2.5	700	0.15
Gravier non saturés zone crépinée	3	700	0.15
Gravier non saturés zone crépinée	3	700	0.15

Sur le bord du maillage la pression atmosphérique est admise.

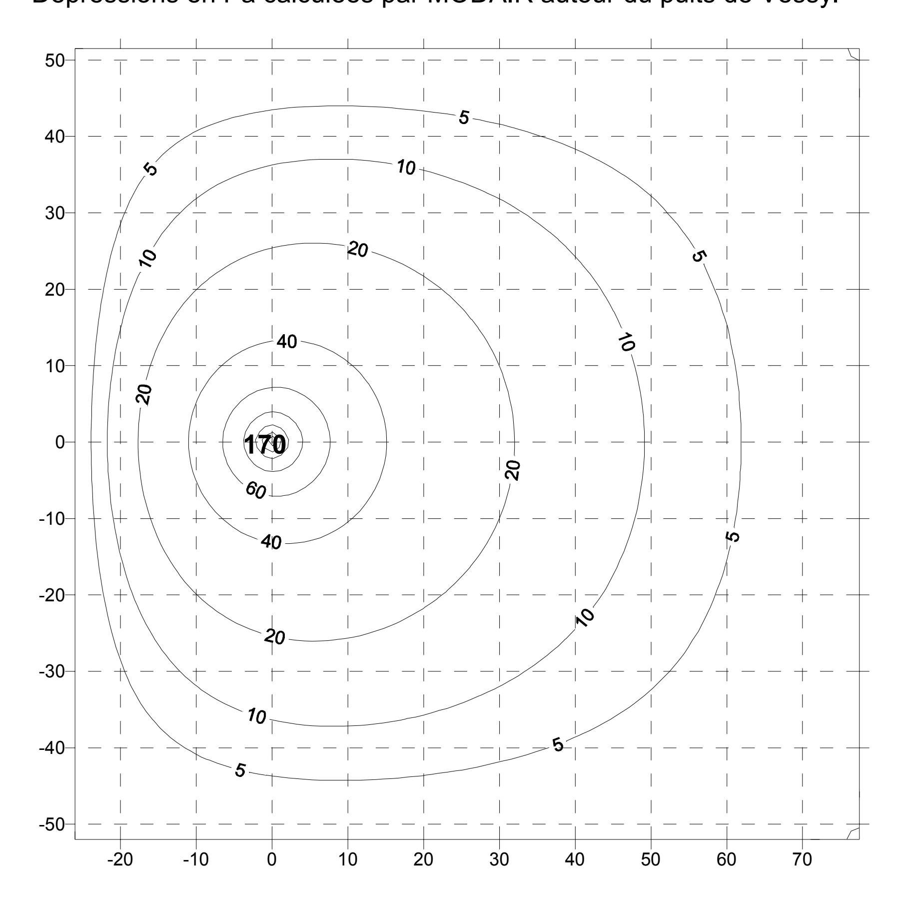
Les dépressions calculées par MODAIR sont données par la figure 1. Elles sont en bonne concordance avec les mesures réalisées à Vessy.

Relevons que pour obtenir de bons résultats, ceci aussi bien pour les calculs simples du chapitre précédent que pour MODAIR, il convient d'admettre que l'air est extrait sur la totalité de la hauteur du puits (15 m), bien que seuls 6 m soient crépinés. Ceci s'explique par le fait que le puits est vraisemblablement entouré d'un filtre grossier (3/30 ou 8/30) sur toute sa hauteur y compris la partie non crépinée.

Ce constat montre que la crépine du puits n'est pas un élément critique.

Figure 1 :

Dépressions en Pa calculées par MODAIR autour du puits de Vessy.



4.2.4 Enseignements des calculs sur le puits de Vessy.

1. Les approches utilisant les modèles pour l'eau moyennant les équivalences du tableau 1 sont correctes dans les cas pratiques.
2. Les formules simples permettent un premier dimensionnement rapide donnant un ordre de grandeur correct.
3. Il faut prendre comme hauteur d'extraction toute la couche perméable non saturée.
4. Les pertes de charges sont essentiellement dues au terrain. La crépine des puits n'est pas un élément critique. Un filtre 8/30 assure le passage de l'air dans le puits. Les sections des puits et tuyauterie doivent être dimensionnées classiquement pour limiter les pertes de charges (limitation des vitesses à 5 m/s).
5. Pour de grands débits, il convient de créer un puits d'extraction équivalent de grand diamètre à l'aide de plusieurs petits puits.
6. Les paramètres essentiels sont la perméabilité et l'épaisseur de la couche dans laquelle s'effectue le pompage

4.3 Simulation d'un projet type « petits immeubles ».

Pour apprécier la rentabilité de l'extraction d'air, nous prenons en compte un bloc de petits immeubles comprenant 18 appartements.

4.3.1 Données thermiques.

- Puissance de chauffage nécessaire : 4 kW par appartement x 18 = 72 kW.
- Puissance amenée à l'évaporateur (COP 3) =48 kW
- Volume d'air nécessaire pour le chauffage 15000 m3/h avec les paramètres suivants :
  - Température de l'air des alluvions 10°C.
  - Humidité de l'air des alluvions 50 %.
  - Capacité thermique de l'air 0.33 $Wh/m^3/K$.
  - PAC travaillant avec un Δt de 10°
- L'air peut également être utilisé pour la climatisation, les volumes pour le rafraîchissement sont semblables.

4.3.2 Stratigraphie et propriété du terrain.

Pour notre projet, nous admettons une couverture imperméable de 10 m puis une hauteur de graviers dénoyés de 10 m.

Les paramètres de calcul sont ceux de Vessy soit :

Porosité n	15 %
Coefficient de perméabilité intrinsèque K	7.10^{-10} m^2 ou 700 darcy*

* 1 darcy = 1.10^{-12} m^2

4.3.3 Prédimensionnement de l'installation d'extraction.

Un calcul avec la formule (8) complété par un calcul par MODAIR V1.0 donne les résultats suivants :

- Disposition des puits correspondant à un rayon équivalent de 50 m (emprise 100 x 100 m).
- Dépression nécessaire : 7'000 Pa
- Puissance de ventilation nécessaire : 40 kW
- Puissance spécifique de ventilation ($kW_{Ventilation}/kW_{Chaleur\ utile\ à\ l'évaporateur}$) : 0.83

On constate sans aller plus loin que la puissance de ventilation consomme pratiquement toute la puissance thermique.

Pour la climatisation, l'énergie pour extraire l'air est également plus importante que l'énergie consommée par une installation classique.

Cet exemple montre que l'extraction d'air ne peut être utilisé que pour de petites installations. En effet pour de grandes installations, soit la surface de captage devient beaucoup trop grande, soit la puissance de ventilation est trop importante.

4.4 Simulation d'un projet type « villa ».

4.4.1 Données thermiques.

- Puissance de chauffage y compris eau chaude : 8.5 kW
- Puissance amenée à l'évaporateur (COP 3.5) =6 kW
- Volume d'air nécessaire 1800 m^3/h avec les paramètres suivants :
    - Température de l'air des alluvions 10°C.
    - Humidité de l'air des alluvions 50 %.
    - Capacité thermique de l'air 0.33 Wh/m^3/K.
    - PAC travaillant avec un Δt de 10°

4.4.2 Stratigraphie et propriété du terrain.

Ici également nous admettons une couverture imperméable de 10 m puis une hauteur de graviers dénoyés de 10 m.

Les paramètres de calcul sont également ceux de Vessy soit :

Porosité n	15 %
Coefficient de perméabilité intrinsèque K	7.10^{-10} m^2 ou 700 darcy*

* 1 darcy = 1.10^{-12} m^2

4.4.3 Prédimensionnement de l’installation d’extraction.

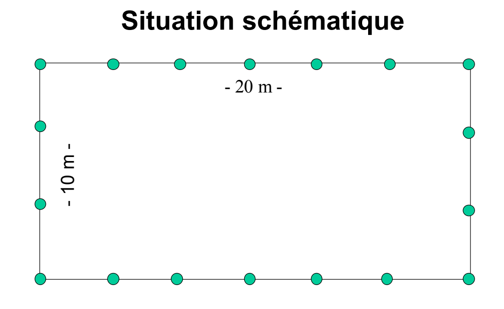
Un calcul avec la formule (8) complété par un calcul par MODAIR V1.0 donne les résultats suivants:

- Disposition des puits correspondant à un rayon équivalent de 8 m (emprise 10 x 20 m).
- Dépression nécessaire : 900 Pa
- Puissance de ventilation nécessaire : 0.6 kW
- Puissance admise PAC (COP 3.5) : 1.7 kW
- COP global : 2.6
- Puissance spécifique de ventilation ($kW_{Ventilation}/kW_{Chaleur\ utile\ à\ l'évaporateur}$) : 0.1

Dans ce cas, un captage est envisageable. Une distance de plus de 200 m est toutefois nécessaire entre chaque installation (rayon d’action du captage).

Le calcul avec MODAIR V1.0 correspond à une disposition comprenant 18 puits de 100 m^3/h chacun et disposés selon le schéma de la figure 2 :

Figure 2 : Disposition des puits de captage pour une villa.



Les puits sont espacés de 3.33 m et ont un diamètre d’environ 75 mm, ce qui correspond à une vitesse de l’air dans les puits d’environ 6 m/s.

La répartition des pressions est donnée par la figure 3.

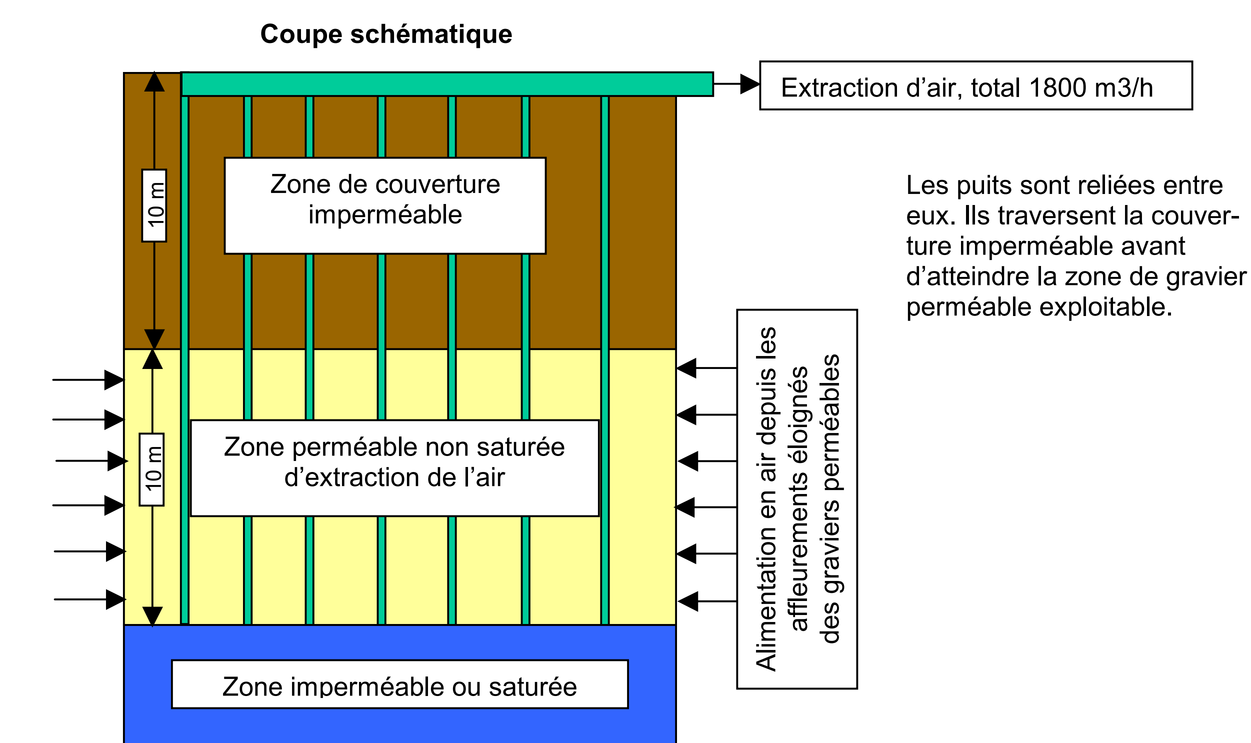
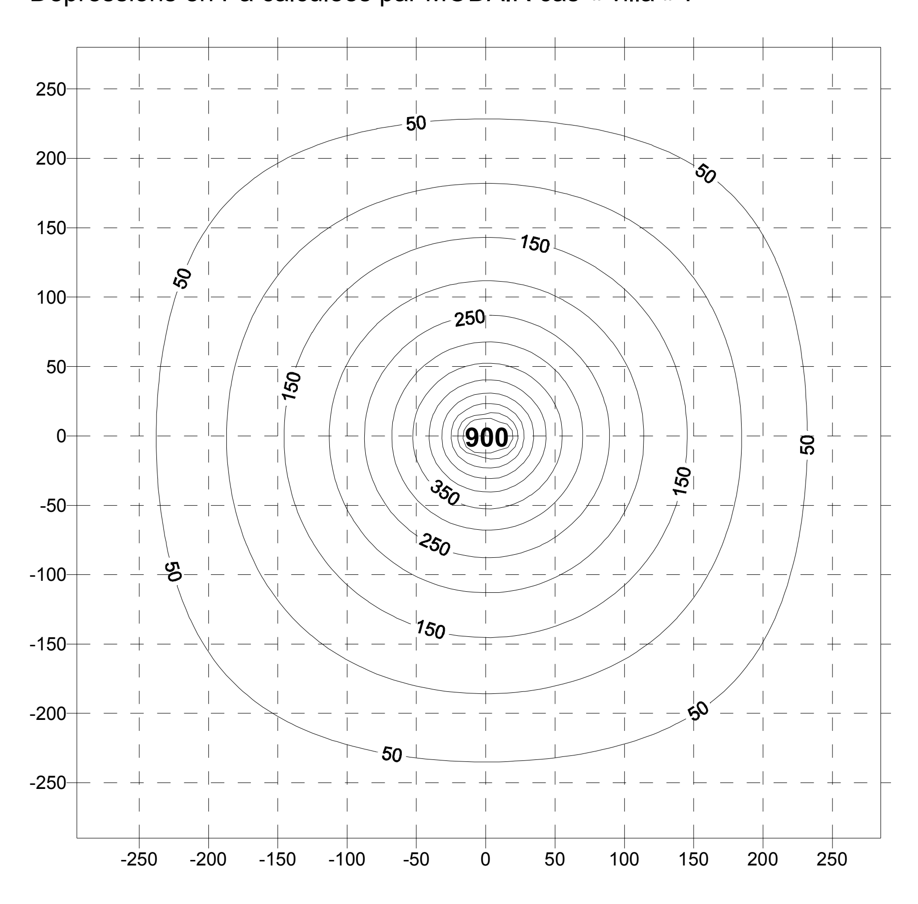


Figure 3 :

Dépressions en Pa calculées par MODAIR cas « villa » :



4.5 Précision des calculs.

La fourchette de perméabilité donnée au chapitre 4.1 (Coefficient de perméabilité intrinsèque $K=1.10^{-12}$ à 7.10^{-10} m^2) montre une variation d'un facteur 100.

Les débits d'air calculés sont directement proportionnels à la perméabilité et à la hauteur perméable. Il convient donc avant tout projet de déterminer ces paramètres au mieux, ceci de préférence sur la base d'essais in situ. La perméabilité admise pour tous les calculs ci-dessus ($K=7.10^{-10}$ m^2) correspond au haut de la fourchette. Elle a été mesurée à Vessy (Genève).

Ainsi, avec la baisse de la perméabilité, le pompage d'air peut rapidement devenir totalement sans objet, le rendement étant juste acceptable pour le haut de la fourchette et ceci uniquement pour de la villa. Relevons également qu'une hauteur perméable de moins de 10 m devient difficilement exploitable.

4.6 Coûts.

Pour le cas « villa » étudié, on obtient :

- Puissance de pompage nécessaire (cas villa) $kW_{Ventilation}$ = 0.6 kW.
- Puissance spécifique de ventilation (cas villa) $kW_{Ventilation}/kW_{Chaleur\ utile\ à\ l'évaporateur}$ = 10 %.
- Estimation du coût spécifique de l'énergie sans les investissements en $Fr/kWh_{Chaleur\ utile}$ = 0.0406.

Le coût spécifique de l'énergie sans les coûts d'investissement a été estimé sur la base d'un prix de 0.15 Fr. le kWh. Ce coût varie d'une région à l'autre.

Un estimatif des coûts d'investissements est donné par le tableau 2 ci-après :

Tableau 2 : coûts d'investissement estimatifs (sans PAC)

Position	**Prix hors TVA**
Etude de faisabilité, vérification de la perméabilité du terrain	20'000.--
Exécution des 18 forages totalisant 360 m	45'000.--
Conduites reliant les forages au ventilateur	4'500.--
Caisson ventilateur type Modlair	2'500.--
Total	**72'000.--**

4.7 Potentiel suisse.

Les formations appropriées pour le pompage d'air doivent avoir une forte perméabilité et une épaisseur exploitable d'au moins 10 m.

Ces zones se rencontrent dans des dépôts fluvio-glaciaires ou morainiques graveleux hors nappe comme les cailloutis morainiques profonds genevois (würm). Les graviers des vallées alluviales sont, par contre, le siège d'une nappe qui ne laisse généralement pas des épaisseurs dénoyées suffisantes.

Pour la recherche des zones concernées, nous nous sommes basés essentiellement sur la planche 16 « hydrogéologie » de l'atlas de la suisse [10] et la planche 8.4 de Atlas hydrologique de la Suisse « Principaux types d'aquifères » [11]. Une demande d'information a également été faite à différents services cantonaux de géologie. Dans [10], c'est essentiellement les graviers en dehors des vallées alluviales importantes qui sont à considérer. Les renseignements obtenus par les services de géologie ont permis de vérifier et de compléter ponctuellement les données de [10], [11].

La population habitant les zones concernées a été tirée de [12], [13] (état 1999).

Une récapitulation du potentiel pour les cantons concernés est donnée par le tableau 2. Seules les zones constructibles ont été considérées.

Tableau 2 : Potentiel Suisse maximum par canton basé sur les statistiques de la population de 1990.

Canton	Population totale	Population maximale concernée ville	%	Population maximale concernée campagne	%
Argovie	540'500	0	0.0	19'000	3.5
Berne	943'000	103'000	10.9	35'500	3.8
Bâle-Campagne	258'500	0	0.0	7'500	2.9
Bâle-Ville	188'000	18'000	9.6	0	0.0
Genève	403'000	74'000	18.4	26'500	6.6
Fribourg	234'000	12'500	5.3	16'500	7.1
Jura	68'500	0	0.0	2'000	2.9
Lucerne	345'000	17'000	4.9	13'500	3.9
Neuchâtel	165'500	0	0.0	2'500	1.5
St.Gall	447'500	8'500	1.9	16'000	3.6
Schaffhouse	73'500	5'000	6.8	8'000	10.9
Schwytz	128'000	0	0.0	5'000	3.9
Soleure	243'500	0	0.0	4'000	1.6
Thurgovie	227'000	0	0.0	3'500	1.5
Vaud	616'000	17'000	2.8	32'000	5.2
Zoug	97'500	19'000	19.5	8'000	8.2
Zurich	1'198'500	32'000	2.7	40'000	3.3
Suisse	**7'164'500**	**306'000**	**4 %**	**239'500**	**3 %**

Rappelons qu'au vu des débits d'air nécessaires, l'installation pour des immeubles - donc en ville - n'est pas intéressante. C'est donc le 3 % campagne qu'il faut retenir. Ces 3% doivent encore être réduits en raison des zones ne présentant pas les perméabilités suffisantes et du fait des différentes restrictions d'aménagement du territoire (notamment protection des nappes) pouvant interdire ce genre d'installation.

Nous estimons finalement à environ 0.5% de la population le potentiel suisse.

4.8 Programme d'essai in situ.

Une installation d'essai in situ basé sur l'exemple « villa » (chapitre 4.4) permettrait de vérifier les résultats des calculs. Il conviendrait toutefois de trouver un site approprié (terrain de plus de 20 par 30 m, épaisseur de gravier perméable supérieure à 10 m, possibilité de positionner des points de mesure de pression éloi-gnés).

La description de l'installation est donnée ci-après :

- 18 puits de 75 mm et 20 m de long traversant 10 m de terrain peu perméable puis 10 m de gravier perméable et disposée selon le schéma de la figure 2.
- Raccordement des aiguilles au ventilateur.
- Un ventilateur pouvant créer 1000 Pa de dépression et d'un débit max de 2000 m^3/h.
- 4 puits situés à une distance de respectivement 25 m, 50 m, 100 m et 200 m du centre.
- Des équipements de mesure de pression à l'arrivée dans le ventilateur, dans les 4 puits d'angle et dans les 4 puits éloignés.
- Mesure de débits à la sortie du ventilateur.
- Mesure de la consommation du ventilateur.
- Mesure de la température et de l'humidité de l'air extrait.

Liste des symboles :

w	%	Teneur en eau
ρ	t/m^3	Masse volumique apparente
e0	-	Indice de vide
n	%	Porosité
S	%	Coefficient d'emmagasinement pour l'eau
k	m/s	Coefficient de perméabilité pour l'eau
K	m^2	Coefficient de perméabilité intrinsèque
μ	Pa.s	Viscosité dynamique
P_p	Pa	Pression dans le puits
P_{atm}	Pa	Pression atmosphérique
R_p	m	Rayon du puits
R_{atm}	m	Rayon jusqu'à P_{atm}
h_p	m	Hauteur d'eau dans le puits
h_0	m	Hauteur d'eau de la nappe
Q	m^3/s	Débit
Δz	m	Hauteur d'extraction d'air
T	m^2/s	Transmissivité d'une nappe
ε	%	Porosité pour l'air

Bibliographie :

[1] Description Géologique du Canton de Genève - par Alphonse Favre - 1879.
[2] Etude préliminaire des possibilités de pompage de l'air souterrain à Genève, Considérations générales et mesures thermiques et dynamiques succinctes - SCG - Octobre 1979 - Réf. 100.79.C.
[3] L'analyse de l'air du puits soufflant de Meyrin - Institut d'Hygiène, service de toxicologie industrielle, d'analyse de l'air et de protection contre le bruit - février 1980.
[4] Chauffage et climatisation à l'aide de l'air de l'Alluvion ancienne dénoyée Rapport No. 2181 du 16.8.1999.
[5] Sols genevois, étude statistique des sols de la cuvette genevoise, rapport de synthèse No 1940/10, SCG – GADZ décembre 1997
[6] Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols, Maurice Cassan, Eyrolles 1980.
[7] Société Ate-Geoclean (France) relation k_{eau}-K utilisée pour le calcul préliminaire d'une installation de venting
[8] Modair Version 1.0, chapitre 1 et 2 du mode d'emploi, Weixing Guo, mai 1996.
[9] Innovative site remediation technology, Vacuum vapor extraction, Paul C. Johnson, Edited by William C. Anderson, P.E., DEE, 1994
[10] Atlas de la Suisse, planche 16 Hydrogéologie, Heinrich Jäckli, Office fédéral de topographie, Wabern-Berne, 1967
[11] Atlas hydrologique de la Suisse, planche 8.4 Principaux types d'aquifères, Antonio Dematteis et al., Office fédéral de topographie, Wabern-Berne, 1992
[12] Annuaire statistique de la Suisse 2001 – numérique, Office fédéral de la statistique, Neuchâtel, 2001
[13] Atlas de la Suisse, planche 23 Répartition de la population en 1980, Ernst Spiess, Office fédéral de topographie, Wabern-Bern, 2e édition, 1984